بررسی اثرات لایهٔ میانی در محصورشدگی ستون‌های بتن آرمهٔ تقویت‌شده با ورقه‌های CFRP★

حمید کریمی‌زاده[۱]   محمدرضا افتخار[۲]

چکیده *امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی پلیمری (FRP) به‌عنوان یک مادهٔ تقویتی برای تعمیر و تقویت اجزای مهم سازه‌های بتن‌آرمه به‌خصوص ستون‌ها، رواج گسترده‌ای پیدا کرده است. در این تحقیق با انجام آزمایش بارگذاری محوری، تأثیر لایه‌ی میانی بر بهبود رفتار محصورشدگی ستون‌های بتن‌آرمه بررسی شده است. برای این هدف، ۱۴ عدد ستون بتن‌آرمه به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و به روش‌های مختلف توسط یک یا دو لایه ورق FRP تقویت‌شده و تحت بار فشاری محوری قرار گرفته است. در این رابطه تأثیر محصورشدگی با نوارهای منقطع CFRP در حالت سنتی (بدون استفاده از لایهٔ میانی) و با استفاده از شیوهٔ نوین بررسی شده در تحقیق حاضر، با یکدیگر و با نتایج بارگذاری ستون‌های با تسلیح داخلی و بدون تقویت خارجی (به‌عنوان نمونه شاهد) مقایسه شده است. روش جدید شامل استفاده از یک لایه ورق نازک گالوانیزه به ضخامت ۰/۱۳ میلی‌متر می‌باشد که با نصب این ورق در زیر نوار FRP از انتقال تمرکز تنش ناشی از ترک‌خوردگی بتن به ورق FRP ممانعت می‌شود. وجود لایه میانی ضمن کاهش انتقال تنش‌های دومحوره به ورق FRP، باعث افزایش قابل توجه مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت‌شده با لایهٔ میانی نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده در حالت سنتی می‌شود.*

واژه‌های کلیدی ستون بتن‌آرمه، لایهٔ میانی، محصورشدگی، کامپوزیت CFRP، مقاومت فشاری، شکل‌پذیری.

Intermediate Layer Effects in Performance of FRP-Confined RC Columns

H. Karimizadeh   M. R. Eftekhar

Abstract *The use of polymer composite (FRP) as a reinforcement material for the repair and strengthening of important components of reinforced concrete structures, particularly columns, has found wide spread. In this study, the effect of intermediate layer on improving the confinement behavior of reinforced concrete columns has been investigated. To achieve the objectives of the study, 14 cylindrical reinforced concrete specimens with 150 mm diameter and 500 mm height were tested under pure axial load. The columns have been classified into four groups and were reinforced by one or two layers of carbon fibers and then to investigate the research topic, confinement with intermittent CFRP strips was performed in both traditional (Without intermediate layer) and modern method examined in the present study and the results were compared together and with the results of loading columns with internal reinforcement and without external reinforcement (the control sample). The new method involves using a thin layer of galvanized sheet (thickness 0.13 mm) which is mounted under the FRP sheet to prevent the transmission of stress concentration induced cracking concrete to FRP Sheets.The middle layer reduces the transfer of biaxial stress to FRP sheettoo. The results suggest that specimens reinforced with FRP and galvanized sheets have higher strength and ductility than specimens reinforced with FRP and without Galvanized.*

Key Words RC column, Intermediate layer, Confinement, CFRP Composite ,Compressive Strength, Ductility.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۲/۳۰ می‌باشد.

(۱) فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان. a.karimizadeh@cv.iut.ac.ir

(۲) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

مقدمه

وقوع زمین‌لرزه‌های پی‌درپی در چند دهـهٔ اخیـر باعـث پیشرفت‌هـای زیـادی در علـوم مهندسـی بـه‌خصـوص مهندسی عمران شده است. از جملهٔ این پیشرفت‌ها می‌توان به تدوین آیین‌نامه‌های قابل اعتمادتر برای طراحـی ساختمان‌های بتنی، فولادی و ساختمان‌های بـا مصـالح بنایی اشاره کرد. اما با گذشت زمان و سپری شدن عمـر مصالح، تغییر در آیین‌نامه‌ها، وقوع حـوادث غیرمترقبـه، بروز عوامل مخرب طبیعی و هـم‌چنـین تغییـر کـاربری ســاختمان، ســازه‌هــا دچــار تخریــب و نقــص مـی‌شـوند. بـروز ایـن نقـایص، زمینـه را بـرای انجـام تحقیقات در مورد تقویت سازه‌ها فراهم می‌کند. از مهم‌ترین راه‌کارهایی که پژوهشگران در چند دههٔ اخیر برای تقویــت ســاختمان‌هــای بتنــی پیشــنهاد کــرده‌انــد محصورسـازی اعضـای سـاختمان اسـت. سـتون‌هـا از مهم‌ترین اجزای ساختمان می‌باشند که تاکنون مطالعـات گسترده‌ای در مورد محصورشدگی آنها انجام شده است. پژوهشــگران بــرای دورگیــری ســتون‌هــا از ژاکت‌های فولادی، بتنی و کامپوزیتی استفاده کـرده‌انـد. امروزه ژاکت‌های فـولادی بـه‌دلیـل امکـان‌خـوردگی و صعوبت در اتصال کامل به وجوه ستون مورد تقویـت و ژاکت‌های بتنی نیز به‌دلیل زمان زیاد اجرا، افزایش ابعـاد ستون، افزایش بار مـردهٔ وارد بـر سـاختمان و تغییـر در معماری سازه کمتر مورد توجه قرارگرفته و عمدتاً جای خود را به ژاکت‌های کامپوزیتی داده‌اند [1,2].

از مهم‌ترین مزایای ژاکت‌های کامپوزیتی مـی‌تـوان به دوام بسیار زیاد در مقابـل عوامـل مخـرب محیطـی، مقاومت کششی زیاد، وزن کم، اجرای ساده و تجهیزات ارزان نصب اشاره کرد [2]. هـم‌چنـین کامپوزیـت‌هـای FRP ضــخامت بســیار کمــی دارنــد و اســتفاده از آن به‌منظور تقویت سازه‌ها هیچ تغییـری در ابعـاد و شـکل ظاهری سازه ایجاد نمی‌کند. علاوه بر این، بـا توجـه بـه ابعاد عضو مورد تقویت، FRP در هـر انـدازه، شـکل و ابعاد قابل اجرا است [3].

مروری بر مطالعات گذشته بر روی ستون‌های محصور شده با کامپوزیت‌ها

مطالعات زیـادی پیرامـون رفتـار سـتون‌هـای بـتن‌آرمـه محصور شده با ژاکت‌هایFRP انجام گرفته است.

پارتی و نانی در سال ۲۰۰۲ با بررسی اثر زاویـهٔی الیاف در ستون‌های محصور شده با FRP به این نتیجـه رسیدند که شکست ستون در همهٔ آرایش‌هـا بـا پـارگی FRP از ناحیهٔ یک سوم میانی همراه بوده است درحـالی که ناحیهٔ پـارگی FRP در سـتون‌هـای بـا نوارهـای ٤۵ درجه در ناحیهٔ وسیع‌تری نسبت به نوارهای ۹۰ درجـه، نسبت به محور ستون، حادث می‌شود. این تحقیق نشان داد که الیاف با جهت عمود بـر محـور سـتون بیشـترین تأثیر را در افزایش مقاومت دارد اما الیـاف بـا زاویـهٔ ٤۵ درجه نسبت به محور ستون، به‌دلیل پخش یکنواخت‌تـر انرژی، با افزایش شکل‌پذیری بیشتری همراه اسـت [4]. شلال و همکاران در سال ۲۰۰۳ با بررسـی سـتون‌هـای کوتاه مربعی و مستطیلی کـه تحـت بـار محـوری قـرار گرفته بودند به بررسی اثر مقاومت مشخصهٔ بتن، نسبت طول به عرض مقطع ستون و تعداد لایه‌هـای CFRP در محصورشــدگی پرداختنــد. آن‌هــا نشــان دادنــد کــه محصورشدگی در هر دو مقطع باعث افـزایش مقاومـت فشاری و شکل‌پـذیری مـی‌شـود، ولـی میـزان افـزایش مقاومــت و شــکل‌پــذیری در ایــن مقــاطع کمتــر از ستون‌های دایروی است. آن‌ها هم‌چنین نشان دادنـد کـه افزایش تعداد لایه‌ها باعـث افـزایش کـارایی (مقاومـت فشاری و شـکل‌پـذیری) مـی‌شـود و میـزان کـارایی در بتن‌های با مقاومت کمتر، بیشتر از بتن‌های بـا مقاومـت معمولی و یا بتن‌های با مقاومت زیاد است؛ به طوری‌که در مقاومت‌های کمتـر، محصورشـدگی باعـث افـزایش تقریباً ۹۰ درصدی ظرفیت باربری می‌شود، درحـالی‌کـه در مقاومت‌های بالاتر این میزان تقریباً ۳۰ درصد اسـت [5]. تریالت و همکاران در سال ۲۰۰٤ به‌منظور بررسـی اثـر انـدازه و نسـبت طـول بـه قطـر بـر میـزان تـأثیر محصورشدگی، ستون‌های بتنی با قطرها و نسـبت‌هـای

طول به قطر مختلف را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که اندازهٔ نمونه در میزان محصورشدگی تأثیر ندارد و مدل‌های تجربی ارائه شده بر اساس نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰x۳۰۰ میلی‌متر قابل اعتماد است؛ ولی در نمونه‌های خیلی کوچک، اثر اندازه قابل توجه است [6]. علاوه بر این تحقیقات دیگری نیز توسط ماتیوس و همکاران [7]، ال-سلوم [8]، هادی [9]، ینگ و همکاران [10,11] انجام گرفته که همگی بیانگر افزایش مقاومت و شکل‌پذیری در ستون‌های بتنی محصورشده با کامپوزیت‌های FRP است.

علی‌رغم وجود تحقیقات فراوان در مورد میزان افزایش شکل‌پذیری و مقاومت ستون‌های بتنی محصورشده با کامپوزیت‌های FRP، بعضی از مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که کرنش گسیختگی FRP ε_{fr} که از آزمایش‌های استاندارد تعیین کرنش در نمونه‌های تخت به‌دست می‌آید، در عمل دست‌نیافتنی است و کرنش گسیختگی صفحات تقویتی دورپیچ در هنگام زوال ستون کمتر از مقدار فوق می‌باشد. بنابراین بخش اعظمی از ظرفیت کششی کامپوزیت بدون استفاده می‌ماند [12]. زیائو و وو [13] لام و تنگ [14]، کل و لارنزیس [15,16] و پسیکی و همکاران [17] در توضیح عدم امکان دسترسی به کرنش نهایی مواد کامپوزیتی به مواردی از قبیل کیفیت بهتر نمونه‌های تخت ورق FRP نسبت به نمونه‌های منحنی شکل، تنش‌های چندمحوره وارد به ژاکت‌های دایروی، تمرکز تنش ناشی از ترک‌های ایجاد شده در بتن، اثر ناحیهٔ هم‌پوشانی، نقایص هنگام نصب و اثرات انقباض، جمع-شدگی و خزش بتن اشاره کردند. هم‌چنین شهاوی و همکاران با اشاره به بعضی از عوامل فوق به‌عنوان عوامل کاهندهٔ کرنش نهایی، از امکان تأثیر عدم تعامد دو سطح فوقانی و تحتانی نمونه بر محور طولی ستون که باعث ایجاد خروج از مرکزیت و تمرکز تنش در ژاکت می‌شود به‌عنوان عامل دیگر کاهش کرنش یاد کردند [18]. علاوه بر عوامل فوق، محققان به عواملی مانند پراکندگی نتایج به‌دست آمده برای کرنش گسیختگی ژاکت، متفاوت بودن روش آزمایش برای نمونه‌های تخت و کامپوزیت استفاده‌شده در ستون، تغییرات ناهمگن در بتن در حین بارگذاری، وجود گوشه‌های تیز در ستون‌های چهارگوش، وجود خلل و فرج در ستون و نقص در کامپوزیت و همین‌طور عبور ژاکت از روی ترک و نهایتاً معکوس بودن کرنش گسیختگی ژاکت با ضخامت آن اشاره کردند [22-19].

ینگ و همکاران با افزایش شعاع گوشه در ستون‌های با مقطع مستطیل شکل، میزان تمرکز تنش وارد شده به کامپوزیت را به مقدار زیاد کاهش دادند و از این طریق کارایی FRP را به مقدار واقعی خود نزدیک‌تر کردند [10,11]. کمپیون در سال ۲۰۰٦ با استفاده از تکنیک تقویت موضعی در گوشه‌های ستون‌های با مقطع مربعی، به این نتیجه رسید که استفاده از تقویت موضعی در گوشه‌ها پیش از دورپیچی با لایه-های محصورکنندهٔ FRP، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع را کاهش می‌دهد و مانع از پارگی زود هنگام کامپوزیت می‌شود [23]. مستوفی‌نژاد و ایلیا در سال ۲۰۱۳ با استفاده از دو تکنیک نوارگوشه-بست و نوارگوشه – دورپیچ در ستون‌های چهارگوش، به بررسی اثرات استفاده از این روش‌ها در کاهش تمرکز تنش وارد شده به کامپوزیت و افزایش کارایی آن پرداختند و نتیجه گرفتند استفاده از این روش‌ها باعث کاهش غیریکنواخت پخش تنش‌ها در مقاطع چهارگوش می‌شود و با ایجاد تنش‌های کششی بیشتر در کامپوزیت موجود در وجوه مقطع و استفاده بیشتر از عملکرد کششی کامپوزیت، مقدار ظرفیت استحصالی از FRP به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۲٤].

در بسیاری از تحقیقاتی که در این مورد انجام گرفته است به تأثیر تنش‌های برشی که علاوه بر تنش حلقوی به ژاکت وارد می‌شود و هم‌چنین تأثیر تمرکز تنش ناشی از ترک‌خوردگی بتن به ورق FRP، به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای کاهنده کرنش در ژاکت اشاره شده

است.

بررسی موضوع و هدف تحقیق

در تحقیق حاضر به‌منظور افزایش ظرفیت باربری و بهبود رفتار شکل پذیری ستون‌های استوانه‌ای و هم‌چنین استفادهٔ بهینه از ظرفیت کششی FRP سعی شده است که با جای‌گذاری یک لایه میانی در حد فاصل سطح بتن و ورق FRP تا حد امکان از انتقال تمرکز تنش ناشی از ترک‌خوردگی بتن به ورق تقویتی جلوگیری شود. مادهٔ استفاده شده به‌عنوان لایهٔ میانی، یک لایه ورق گالوانیزه است که در اندازه‌های تقریباً مشابه با ورق تقویتی بریده شده و در زیر ورق تقویتی قرار می‌گیرد. وجود لایهٔ میانی باعث می‌شود که ترک‌های ناشی از شکست بتن به‌جای انتقال مستقیم به ژاکت FRP، توسط لایه‌ی اضافی میانی جذب شود. هم‌چنین لایهٔمیانی مانع چسبندگی ژاکت به بتن شده که این باعث کاهش انتقال نیروی برشی از بتن به ژاکت (که باعث ایجاد تنش دومحوره در ژاکت و کاهش کارایی آن نسبت به نمونه تخت می‌شود) خواهد شد.

برای اطمینان از عدم نقش محصورسازی ورق گالوانیزه، طول این ورقهٔ اضافی نسبت به محیط ستون در حد یک یا دو میلی‌متر کوتاه‌تر انتخاب شده است تا هیچ‌گونه هم‌پوشانی در ورق گالوانیزه ایجاد نشود. لازم به ذکر است که در روش استفاده‌شده در تحقیق حاضر، وجود لایهٔ میانی، پیوستگی صفحات تقویتی و سطح بتن را به حداقل می‌رساند درحالی که در روش‌های سنتی اتصال ورقه‌های تقویتی به سطح بتن، نظیر روش لایه‌ای مرطوب (Wet Layup)، پیوستگی فیزیکی کامل بین سطوح درگیر به‌واسطهٔ رزین‌های اپوکسی صورت می‌گیرد. تحقیقات کمی در خصوص بررسی اثرات پیوستگی بین سطوح درگیر در تقویت ستون‌های محصورشده توسط ورقه‌های تقویتی انجام گرفته است. در این خصوص میرمیران و همکاران در سال ۱۹۹۸ با بررسی ستون‌های بتنی با مقاطع مربعی و دایروی که با دو روش، یکی با اتصال ورقه‌های FRP به سطح بتن و دیگری با استفاده از لوله‌های FRP که به‌عنوان قالب برای بتن‌ریزی استفاده می‌شوند، به بررسی اثرات پیوستگی در ستون‌های بتنی پرداخته‌اند. در برخی از انواع لوله‌های FRP استفاده شده در تحقیق فوق، از زائده‌های مکانیکی نیز برای درگیری بیشتر بتن و مصالح کامپوزیتی استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هرچند رفتار ستون‌های بدون پیوستگی، ضعیف‌تر از رفتار ستون‌هایی است که اتصال ورق FRP به آن‌ها از طریق زائده‌های مکانیکی فراهم می‌شود، اما رفتار این نمونه‌ها با رفتار ستون‌هایی که در آن‌ها اتصال ورق تقویتی از طریق چسبندگی شیمیایی با سطح بتن صورت می‌گیرد تفاوت قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند [25].

شهاوی و همکاران در سال ۲۰۰۰ با آزمایش روی استوانه‌های بتنی محصورشده با CFRP، و مقایسهٔ نتایج آن‌ها با مدل ارائه شده توسط سامان [1]، که برای بتن محصورشده در لوله‌های GFRP ارائه شده بود، به این نتیجه رسیدند که اولاً پیوستگی بین FRP و بتن تأثیر زیادی در رفتار محصورشدگی ندارد، ثانیاً می‌توان از مدل‌های مشابه‌ای برای بتن محصورشده با الیاف شیشه و الیاف کربن استفاده کرد [18].

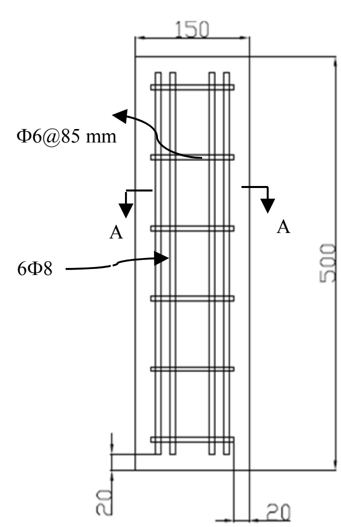
هریس و کاری در سال ۲۰۰۳ نمونه‌های استوانه‌ای که توسط الیاف شیشه و به دو صورت پیوسته و غیرپیوسته تهیه شده بودند را تحت بار محوری فشاری قرار دادند. آن‌ها برای ایجاد ناپیوستگی در نمونه‌ها، از دولایهٔ پلاستیک نازک به ضخامت ۰/۰۸ میلی‌متر در زیر ورق FRP استفاده کردند.این محققان نتیجه گرفتند که ناپیوستگی بین بتن و ژاکت تأثیر زیادی بر محصورشدگی ستون ندارد. نتایج این تحقیق نشان داد که اندک کاهشی در مقاومت فشاری نمونه‌های غیرپیوسته نسبت به نمونه‌های پیوسته وجود

دارد کـه دلیـل ایـن کـاهش مقاومـت در فعـال شـدن دیرهنگام ورق FRP به‌دلیل وجـود فضـای خـالی بـین ژاکت و بتن عنوان شده است. در این تحقیق فعال شدن ورق FRP تقریباً در ۸۵ درصـد بـار حـداکثر گـزارش شده است [22].

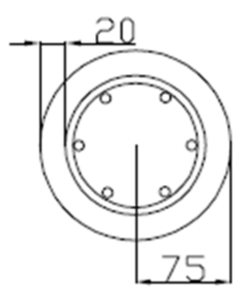
با توجه بـه مطالعـات هـریس و کـاری [22] و از آن‌جا که در روش پیشنهادی حاضر، ممکن است مقـدار بسیار کمی فاصلهٔ آزاد بین ورق میانی و بتن بـه وجـود آید که در مراحل اولیهٔ اتساع، مـانع ازفعـال شـدن ورق تقویتی شود، سعی شـده اسـت کـه از بتونـه بـه‌عنـوان پرکنندهٔ این فاصله‌هـای آزاد اسـتفاده شـود. در واقـع از بتونه به‌عنوان یک مادهٔ کمکی کـه اتسـاع جـانبی را بـه ورق میانی منتقل می‌کنـد و مـانع اتسـاع کـاذب سـتون می‌شود استفاده شده است.

برنامهٔ آزمایشی

آماده سازی نمونه‌ها. در ایـن تحقیـق تعـداد ۱۴ عـدد ستون بتن‌آرمه با مقطع دایره‌ای بـه قطـر ۱۵۰ و ارتفـاع ۵۰۰ میلی‌متر ساخته شد و مورد آزمایش قـرار گرفـت. برای تسلیح داخلی ستون‌هـا از ٦ عـدد آرمـاتور طـولی آجدار به قطر ۸ میلی‌متر (ρ=۱/۷ ٪) و ٦ عدد خـاموت ساده به قطر ٦ میلی‌متر با فواصل ۸۵ میلی‌متری در طول ستون استفاده شده اسـت (شـکل ۱). نمونـه‌هـا پـس از گذشت یک روز از بتن‌ریزی از قالب خارج شـده و بـه مـــدت ۲۸ روز در آب و در دمـــای آزمایشـــگاه عمل‌آوری شده‌انـد. پـس از دوره‌ی عمـل‌آوری، زوائـد احتمالی ناشی از نفوذ شـیرهٔ بـتن در درزهـای قالـب از سطح نمونه توسط سنگ فرز و سمباده برداشته می‌شـود و گرد و خاک موجود در خلل و فرج نمونـه‌هـا توسـط دستگاه کمپرسور هوا برداشته می‌شود. سـپس محـدودهٔ قرارگیـری نوارهـای CFRP بـر روی ارتفـاع نمونـه‌هـا علامت‌گذاری می‌شود و در انتها به‌منظور جلـوگیری از اعمال بارهای خارج از مرکز، سطوح انتهـایی نمونـه‌هـا کلاهک‌گذاری (Capping) می‌شوند.



الف) جزئیات ستون در ارتفاع



ب) Section A-A

شکل ۱ جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها (ابعاد به میلی‌متر)

مشخصات مصالح. نمونه‌های مورد آزمایش برحسب روش و نحوهٔ تقویت در چهار گروه دسته‌بندی شده‌اند. مقاومت مشخصهٔ ستون‌های مورد آزمایش برای هر گروه، از میانگین مقاومت نهایی چهار عدد نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر که اختلاط آن‌ها براساس مقاومت مشخصهٔ ۲۸ مگاپاسکال طرح شده بود به‌دست آمده است. سیمان مصرفی در طرح اختلاط از نوع سیمان پرتلند تیپ ۱ و حداکثر اندازهٔ سنگ‌دانهٔ مصرفی ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. از آن‌جایی‌که ستون‌ها دو تا چهار ماه بعد از ساخت آزمایش شده‌اند مقاومت فشاری آن‌ها در زمان آزمایش بین ۳۰ تا ۳۵ مگاپاسکال متغیر است. مقادیر و اجزای متشکلهٔ طرح اختلاط برای یک مترمکعب بتن و مشخصات مکانیکی میلگردهای مصرفی به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. در جدول (۲) مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی میلگردهای مصرفی که با انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی میلگردها به‌دست آمده است، آورده شده است.

جدول ۱ میزان مصالح مصرفی در طرح اختلاط

نوع مصالح	آب	سیمان	ماسه	شن
میزان مصرف(kg/m^3)	۱۹۵	۳۷۵	۱۰۲۷	۷۲۱

جدول ۲ مشخصات میلگردهای مصرفی

نوع میلگرد	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
شمارهٔ ٦	۳٥٤	۳۹۸
شمارهٔ ۸	٥٥۰	۷۷٤

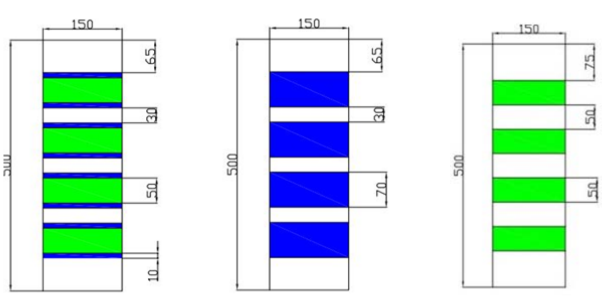
برای تقویت خارجی نمونه‌ها نیز از الیاف کربن با نام تجاری Sika Wrap Hex 230C مطابق جدول (۳) استفاده شده است. هم‌چنین رزین مورد استفاده Sika Dur-330 می‌باشد که مشخصات مکانیکی آن در جدول شمارهٔ (٤) آورده شده است.

جدول ۳ مخصات مکانیکی ورق FRP

نوع ورق	کرنش نهایی ورق (٪)	ضخامت ورق(mm)	مقاومت کششی نهایی(MPa)	مدول الاستیسیته کششی(GPa)
Sika Wrap Hex-230C	۱/۷	۰/۱۲	٤۱۰۰	۲۳۱

جدول ٤ مشخصات مکانیکی رزین

نوع رزین	مقاومت کشش (MPa)	مدول کششی (MPa)	مدول خمشی (MPa)	کرنش نهایی (٪)
Sika Dur-330	۳۰	٤٥۰۰	۳۸۰۰	۱/٥



(ج) (ب) (الف)

شکل ۲ الف) نمونه‌های بدون لایهٔ میانی با عرض ٥۰ میلی‌متر (ابعاد به میلی‌متر)، ب) نمونه با لایهٔ میانی، مرحلهٔ نصب ورق گالوانیزه، ج) نمونه با لایه میانی؛ مرحله نصب FRP

نحوهٔ تقویت با استفاده از ورقه‌های FRP. همه ورق-های تقویتی به‌صورت نوارهایی به طول ۵۷۰ میلی‌متر و در دو عرض۲۵ و ۵۰ میلی‌متر تهیه شده‌اند. برای اتصال ورق تقویتی بر بستر کار از روش لایه‌ای مرطوب (Wet-Layup) استفاده شده است. برای نمونه‌های بدون لایهٔ میانی، مطابق معمول ابتدا سطح نمونه از زوائد احتمالی بتن زدوده می‌شود و گرد و غبار از خلل و فرج بتن برداشته می‌شود. سپس محل ورق تقویتی توسط چسب اپوکسی طوری پوشانده می‌شود که خلل و فرج آن کاملاً از چسب پر شوند؛ در مرحلهٔ بعد ورق FRP روی بتن چسبانده می‌شود و روی سطح ورق به‌منظور اشباع‌سازی کامل، مجدداً با چسب پوشش داده می‌شود. در نمونه‌های با لایهٔ میانی، نیازی به آماده سازی سطحی نبوده و بعد از تسطیح زائده‌های احتمالی بتن در محل درز قالب، ورق گالوانیزه توسط دو سیم نازک در دو لبهٔ بالا و پایین هر نوار (در فاصلهٔ ۱۰ میلی‌متری از لبه و طوری که ژاکت FRP بین آن‌ها قرار گیرد) به بتن محکم بسته می‌شود. لازم به ذکر است که عرض ورق گالوانیزه در این نمونه‌ها نسبت به عرض ورق تقویتی از بالا و پایین ۱۰ میلی‌متر بیشتر انتخاب شده است. سپس با اشباع سطح ورق میانی توسط چسب اپوکسی ورق FRP به روش قبل روی ورق گالوانیزه به گونه‌ای نصب می‌شود که ناحیهٔ همپوشانی FRP در محل اتصال لبه‌های ورق گالوانیزه قرار گیرد. در شکل (۲) جزئیات نمونه‌های با تسلیح خارجی نشان داده شده است. در نمونه‌هایی که از بتونه به‌منظور ماده‌ی پرکننده استفاده می‌شود ابتدا لایه‌ای از بتونه در محل نوارهای تقویتی بر سطح کار اجرا شده و سپس ورق گالوانیزه توسط سیم-های نازک فولادی، قبل از سفت شدن بتونه، در موقعیت مورد نظر تثبیت می‌گردد. در همهٔ نمونه‌های تقویت‌شده، ناحیهٔ هم‌پوشانی برای ورق FRP، تقریباً ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در همهٔ نمونه‌ها برای جلوگیری از تمرکز تنش در دو ناحیهٔ انتهایی و نزدیک صفحهٔ بارگذاری، از دو حلقهٔ فلزی به قطر داخلی۱۵۰، ارتفاع ۵۰ و ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است. برای پرکردن فضای زیر این حلقه فلزی نیز از گچ دندانپزشکی استفاده شده است.

نام‌گذاری نمونه‌ها. نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق مطابق جدول (۵) در چهار گروه طبقه بندی شده‌اند. در هر گروه نمونه‌های بدون تقویت خارجی، به‌عنوان نمونهٔ شاهد، با نام C1 تا C4، نشان داده شده است. در این جدول اعداد ۲۵ و ۵۰ بیانگر عرض نوارهای تقویتی به میلی‌متر، حرف S در صورت وجود در نام نمونه نشان‌دهندهٔ وجود لایهٔ میانی از جنس ورق گالوانیزه، حرف P در صورت وجود نشان دهندهٔ استفاده از بتونه به‌عنوان مادهٔ پرکننده در زیر ورق گالوانیزه و حرف W نیز تقویت نمونه را به‌صورت دورپیچ کامل در تمام ارتفاع نشان می‌دهد. هم‌چنین نماد I و II در انتهای نام نمونه‌ها معرف تعداد لایه‌های ورق تقویتی است.

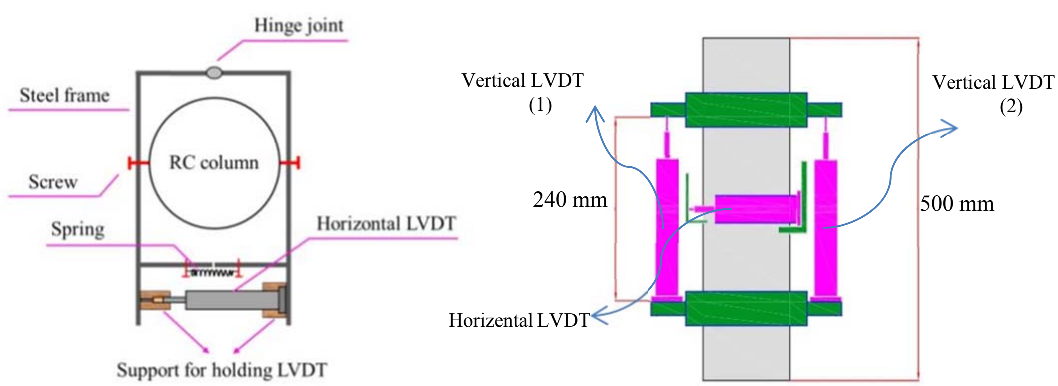
روش بارگذاری و ثبت نتایج. نمونه‌ها توسط دستگاه پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و به روش کنترل جابه‌جایی (Displacement Control) با سرعت بارگذاری یک میلی‌متر بر دقیقه تحت بار محوری فشاری قرار گرفته و بارگذاری نمونه‌ها پس از حصول حداکثر باربری تا رسیدن به ۵۰ درصد بار حداکثر در شاخهٔ نزولی، ادامه پیدا کرده است. نتایج مربوط به بار و تغییرمکان‌های طولی و عرضی نمونه در نقاط متناظر بارگذاری، توسط دستگاه دیتالاگر ثبت شده است. برای به‌دست آوردن تغییرمکان محوری از دو عدد جابه‌جایی‌سنج (LVDT) که در ناحیهٔ ۲۴۰ میلی-متری وسط و در طرفین نمونه نصب شده‌اند، استفاده شده است. برای محاسبهٔ کرنش محوری از میانگین نتایج به‌دست آمده از این دو LVDT استفاده شده است.

همچنین برای به‌دست آوردن کرنش عرضی نمونه‌ها از یک عدد LVDT افقی در وسط نمونه مطابق شکل (۳-ب) استفاده شده است. نحوهٔ نصب LVDT ها در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. دقت اندازه‌گیری تجهیزات ثبت جابه‌جایی ۰/۰۰۵ میلی‌متر و حداکثر تغییرمکان قابل اندازه گیری توسط آن‌ها ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۵ ویژگی ستون‌ها

شمارهٔ گروه	نام ستون	F'_{co} (MPa)	نوع FRP	تعداد لایه	تعداد ورق FRP	ابعاد ورق FRP	تعداد ورق گالوانیزه	ابعاد ورق گالوانیزه	بتونه
1	C1	38.30	-	0	0	-	0	-	-
	C1-50.I	38.30	CFRP	1	4	50*570 mm	0	-	-
	C1-S-50.I	38.30	CFRP	1	4	50*570 mm	4	70*570 mm	-
2	C2	35.26	-	0	0	-	0	-	-
	C2-50.I	35.26	CFRP	1	4	50*570 mm	0	-	-
	C2-S.P-50.I	35.26	CFRP	1	4	50*570 mm	4	70*570 mm	*
3	C3	36.05	-	0	0	-	0	-	-
	C3-50.II	36.05	CFRP	2	8	50*570 mm	0	-	-
	C3-S.P-50.II	36.05	CFRP	2	8	50*570 mm	4	70*570 mm	*
4	C4	33.62	-	0	0	-	0	-	-
	C4-W.I	33.62	CFRP	1	8	50*570 mm	0	-	-
	C4*-S.P-50.I	33.62	CFRP	1	4	50*570 mm	4	70*570 mm	*
	C4-S.P-25.I	33.62	CFRP	1	8	25*570 mm	8	45*570 mm	
	C4-S.P-25.II	33.62	CFRP	2	16	25*570 mm	8	45*570 mm	

*استفاده از یک لایه پلاستیک به ضخامت ۰/۰۲ میلیمتر بین ورق گالوانیزه و ورق FRP



(ب) (الف)

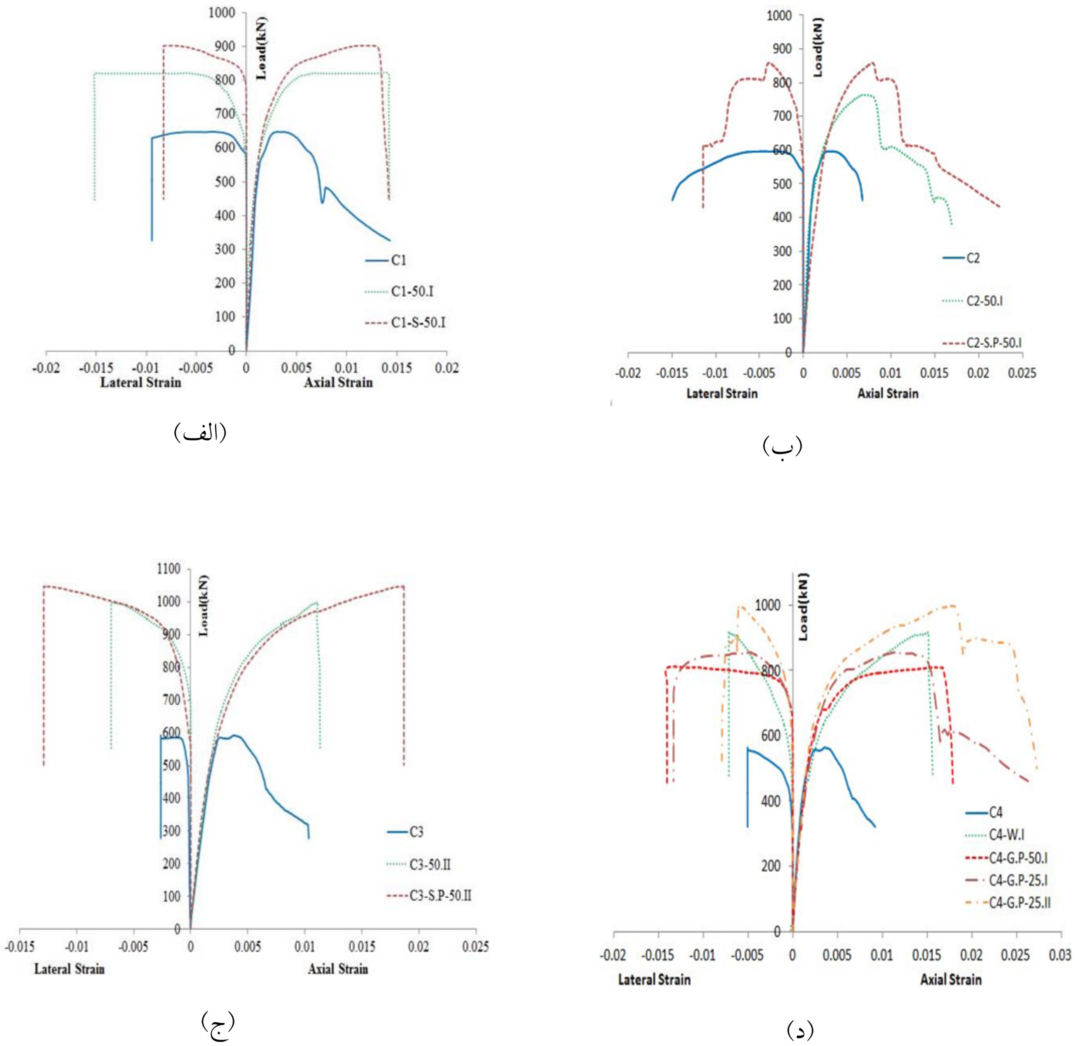
شکل ۳ الف) تصویر شماتیک نحوهٔ نصب LVDT ها ب) نحوهٔ نصب LVDT جانبی

بحث و بررسی نتایج

نتایج مربوط به آزمایش فشاری روی نمونه‌ها در جدول (٦) نشان داده شده است؛ در این جدول نتایج مربوط به بار حداکثر (p_{max})، کرنش متناظر با بار حداکثر (ε_{c0})، کرنش محوری نهایی (ε_{cc}) و سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان (E_u)، که بیانگر انرژی جذب شده می‌باشد، آورده شده است. لازم به توضیح است که در بسیاری از مقالات [26,27]، از سطح زیر منحنی تنش کرنش که بیانگر میزان جذب انرژی توسط سیستم و یا به عبارتی مقدار کار انجام شده توسط نیروی خارجی روی سیستم می‌باشد، به‌عنوان معیاری برای شکل‌پذیری ستون‌ها استفاده شده است؛ در این تحقیق نیز از این موضوع به همراه میزان کرنش نهایی نمونه‌ها به‌عنوان دو معیار برای شکل‌پذیری ستون‌ها استفاده شده است. همچنین برای بیان میزان کارایی روش‌های به‌کار رفته در این تحقیق، از مقادیر $\frac{p_{max}}{p_{max\,0}}$ و $\frac{E_u}{E_{u0}}$ که به‌ترتیب بار حداکثر و انرژی جذب‌شده هر نمونهٔ نسبت به بار حداکثر و انرژی جذب شدهٔ نمونه شاهد گروه خود می‌باشد، استفاده شده است. منحنی‌های بار- کرنش گروه‌های ۱ تا ٤ نیز در شکل (٤) آورده شده است. در شکل (٤) محور قائم منحنی‌ها ظرفیت باربری و محور افقی میزان کرنش ایجاد شده در ستون را نشان می‌دهد. محور افقی منحنی‌های بار – کرنش در نمونه‌های آزمایشی، نشان دهنده‌ی میزان کرنش محوری و کرنش جانبی ناشی از اتساع ستون‌های تحت بارگذاری است؛ به طوری که طرف مثبت محور افقی، کرنش محوری ستون و طرف منفی محور افقی کرنش جانبی ستون را نشان می‌دهد. مطابق شکل (٤)، رفتار بار-کرنش محوری نمونه‌های آزمایشی را می‌توان به دو گروه متمایز تقسیم کرد. برخی از نمونه‌ها (نظیر نمونه‌های بدون تقویت)، دارای شکست نرم هستند و پس از حصول حداکثر بار محوری، با افت ناگهانی بار مواجه نمی‌شوند. در این نمونه‌ها کاهش ظرفیت باربری در شاخهٔ نزولی منحنی بار- کرنش به تدریج صورت می‌گیرد. در این نمونه‌ها، برای نقطه‌ی نهایی ظرفیت باربری، از نقطه‌ی معادل ۸۵ ٪ بار حداکثر استفاده شده است. در نمونه‌های دستهٔ دوم که افت ناگهانی بار در آن‌ها حادث شده است، نقطه‌ی حداکثر باربری به‌عنوان نقطهٔ نهایی ظرفیت باربری نمونه منظور شده است.

جدول ٦ نتایج به‌دست آمده از آزمایش نمونه‌ها

شمارهٔ گروه	نام ستون	p_{max} (kN)	ε_{c0}	ε_{cc}	E_u (N.m)	$\frac{p_{max}}{p_{max\,0}}$	$\frac{E_u}{E_{u0}}$
1	C1	648.2 7	0.00319	0.00695	865	1	1
	C1-50.I	821.74	0.00689	0.00775	1222	1.27	1.41
	C1-S-50.I	902.38	0.01084	0.01084	1904	1.39	2.20
2	C2	596.77	0.00315	0.00640	733	1	1
	C2-50.I	763.17	0.00738	0.00828	1203	1.28	1.64
	C2-S.P-50.I	858.18	0.00780	0.01030	1592	1.44	2.17
3	C3	592.22	0.00382	0.00597	644	1	1
	C3-50.II	997.70	0.01107	0.01113	1904	1.68	2.96
	C3-S.P-50.II	1047.20	0.01866	0.01868	3362	1.77	5.22
4	C4	564.02	0.00358	0.00579	622	1	1
	C4-W.I	917.76	0.01513	0.01514	2502	1.63	4.07
	C4*-S.P-50.I	810.44	0.01593	0.01677	2718	1.44	4.37
	C4-S.P-25.I	856.74	0.01179	0.01352	2221	1.52	3.57
	C4-S.P-25.II	998.17	0.01766	0.01813	3403	1.77	5.47

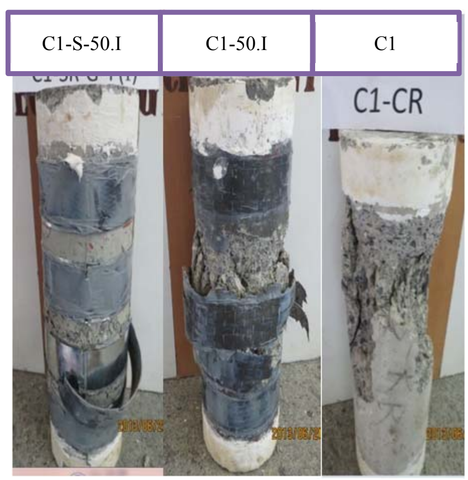


نمودار بار– کرنش جانبی نمونه C2-50.I به‌دلیل از کار افتادن LVDT جانبی ثبت نشده است

شکل ٤ منحنی‌های بار کرنش؛ الف) گروه اول؛ ب) گروه دوم؛ ج) گروه سوم؛ د) گروه چهارم

مود شکست و رفتار منحنی‌های بار– کرنش نمونه‌ها. به منظور بررسی و مقایسهٔ مود گسیختگی نمونه‌ها، تصویر شکست نمونه‌های گروه اول در شکل (۵) نشان داده شده است. در نمونهٔ شاهد مطابق شکل (۵–الف) با افزایش بارگذاری، ابتدا ترک‌های موازی با محور نمونه در آن ایجاد می‌شود، سپس با کمانش آرماتورها، پوستهٔ بتنی کنده می‌شود و به بیرون پرتاب می‌شود. برای نمونه‌های تقویت‌شده، عمدتاً شکست ستون با پارگی FRP در ناحیهٔ یک‌سوم میانی حادث شده است؛ طوری که در نمونهٔ بدون لایهٔ میانی، پوستهٔ بتنی همراه با FRP به فرم یک گوه از نمونه خارج می‌شود (شکل ۵–ب). در نمونهٔ همراه با لایهٔ میانی (شکل ۵– ج) ابتدا ریزترک‌هایی در بتن و در ناحیهٔ میانی ایجاد می‌گردد. با اتساع بیشتر ستون، فشار وارد به ورق گالوانیزه نیز بیشتر می‌شود؛ ورق گالوانیزه ضمن جلوگیری از انتقال این ترک‌ها به ورق FRP قادر است رشد بیشتری از ترک را بدون آسیب به فرم ظاهری خود تحمل کند و در نهایت به‌دلیل اتساع بیش از حد ستون و بازشدگی

بیشتر ترک، شرایط پارگی ورق تقویتی FRP را فراهم نماید. لازم به ذکر است که اندازهٔ بازشدگی ترک‌ها در نمونه‌های با لایهٔ میانی در لحظهٔ رسیدن به بار حداکثر نسبت به نمونه‌ی شاهد و نمونهٔ بدون لایهٔ میانی بسیار بزرگ‌تر است که می‌تواند مؤید تحمل بار و تغییرمکان بیشتر این نمونه باشد؛ اما با این وجود به دلیل ممانعت لایه‌ی میانی، این ترک‌ها به ورق FRP منتقل نمی‌شوند. همان‌گونه که در شکل (۵-ج) نیز نشان داده شده است، بعد از پارگی ورق FRP، این ورق به‌طور کامل از ورق گالوانیزه جدا شده است. این مطلب نشانگر آن است که تقریباً هیچ‌گونه انتقال نیروی برشی از ورق FRP به ورق گالوانیزه که منجر به نقش باربری ورق گالوانیزه شود، صورت نمی‌گیرد. مود کلی گسیختگی نمونه‌های سایر گروه‌ها، صرف نظر از نوع آرایش، تقریباً مشابه نمونه‌های گروه اول می‌باشد.



شکل ۵ نحوهٔ زوال و شکست نمونه‌ها، الف) نمونه شاهد ب) نمونه بدون لایه میانی ج) نمونهٔ با لایهٔ میانی

برای تحلیل حالت رفتاری نمونه‌ها، منحنی بار-کرنش نمونه‌های گروه‌های اول تا چهارم در شکل (٤) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (٤) دیده می‌شود، قسمت اولیهٔ همهٔ منحنی‌ها (مربوط به هر گروه) بر هم منطبق است که این بیانگر سختی یکسان ستون‌ها در مراحل اولیهٔ بارگذاری و غیرفعال بودن ورق تقویتی به‌دلیل اتساع کم ستون است.

با توجه به شکل (٤-الف) منحنی مربوط به نمونهٔ C1-50.I (نمونهٔ تقویت‌شده به روش سنتی) بعد از رسیدن به بار حداکثر به‌صورت کاملاً افقی، که نشانگر حالت پلاستیک می‌باشد، ادامه پیدا کرده و درنهایت با افت شدید بار که در نقطه نهایی اتفاق افتاده، به زوال رسیده است. درواقع حالت پلاستیک که در ستون و با این میزان کامپوزیت مصرفی به‌دست آمده است، بیانگر محصورشدگی مؤثر و کافی نمونه می‌باشد. با توجه به این شکل، منحنی مربوط به ستون C1-S-50.I (تقویت‌شده با لایهٔ میانی) به‌صورت یک منحنی دو قسمتی می‌باشد که هر دو قسمت آن صعودی است. در حقیقت بعد از رسیدن بار به مقدار بار متناظر با کرنش شکست نمونهٔ محصور نشده، منحنی با یک ناحیهٔ انتقال وارد ناحیه‌ی صعودی اما با شیب کمتر شده و در نهایت با افت شدید بار در نقطهٔ حداکثر بار، که معادل با نقطه نهایی نیز می‌باشد، مواجه می‌شود. با مقایسهٔ این منحنی با منحنی مربوط به نمونه C1-50.I می‌توان نتیجه گرفت که ورق گالوانیزه با ممانعت از انتقال تمرکز تنش و تنش‌های چند محوره به FRP باعث شده است که منحنی بار- کرنش محوری از حالت الاستوپلاستیک به حالت کرنش- سختی که نشانگر محصور شدگی مؤثرتری است، میل پیدا کند. لازم به ذکر است که اگر مقطع ستون به اندازهٔ کافی تحت فشار محصورشدگی قرار گیرد، منحنی تنش-کرنش بتن به‌صورت دوخطی و همراه با دو شاخهٔ صعودی است؛ به این رفتار کرنش-سختی اطلاق می‌شود. در این نوع رفتار، مقاومت فشاری حداکثر و کرنش حداکثر در یک نقطه اتفاق می‌افتد و تنش حداکثر و تنش نهایی برابر است. اگر میزان محصور شدگی به اندازه کافی مؤثر نباشد، منحنی تنش-کرنش بعد از نقطه اوج با شاخهٔ نزولی همراه است که این رفتار به کرنش- نرمی معروف است.

برای نمونه‌های دولایه نیز همان‌گونه که از شکل (٤-ج) مشخص است منحنی بار-کرنش محوری

نمونه‌های محصورشده به‌دلیل میزان محصورشدگی بیشتر، دارای شیب و طول بیشتری نسبت به نمونه‌های زیرگروه یک است که بیانگر مقاومت و جذب انرژی بالاتر می‌باشد. برای بررسی اتساع جانبی نیز همان‌گونه که منحنی‌های بار-کرنش جانبی نشان می‌دهند، همهٔ نمونه‌های تقویت‌شده در میزان اتساع بیشتری نسبت به نمونهٔ شاهد به نقطهٔ شکست خود رسیده‌اند.

تأثیر روش تقویت. در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر لایهٔ میانی در کارایی FRP، علاوه بر بررسی تأثیر فضای خالی بین سطح بتن و لایهٔ میانی به بررسی اثر تعداد لایه‌های تقویتی، اثر عرض نوار و همین‌طور اثر تقویت به‌صورت دورپیچ کامل پرداخته شده است. درادامه اثر هرکدام از این عوامل به‌صورت جداگانه بررسی شده است.

الف) تأثیر تعداد لایه‌ها: با مقایسهٔ ظرفیت باربری به‌دست آمده برای نمونه‌های تقویت‌شده با یک لایه و دو لایه ورق تقویتی (جدول ٦)، مشاهده می‌شود که با دو برابر کردن لایه‌ها، میزان افزایش کارایی نیز بیش از دو برابر شده است. دلیل این موضوع را شاید بتوان در کارایی کمتر لایهٔ اول (نسبت به سایر لایه‌ها) و مؤثرتر بودن عوامل کاهندهٔ کرنش در لایهٔ اول جست‌وجو کرد. لایهٔ اول به دلیل تماس مستقیم با سطح بتن، در مقایسه با سایر لایه‌ها بیشترین تأثیر را از ترک‌های وارد به سطح بتن می‌پذیرد؛ بنابراین معمولاً کارایی لایه‌های بعدی نسبت به لایهٔ اول بیشتر است و افزایش ظرفیتی که در نمونه‌های دولایه مشاهده می‌شود (با توجه به میزان مصرف FRP) به‌دلیل کارایی بهتر لایهٔ دوم می‌باشد. این موضوع بیان‌گر تأثیرات زیاد پیوستگی بتن و کامپوزیت در کاهش کارایی FRP می‌باشد و اهمیت این تحقیق را بیشتر مشخص می‌سازد.

ب) تأثیر تقویت به‌صورت نوار منقطع و دورپیچ کامل: به‌منظور بررسی تأثیر پیوستگی نوارهای دورپیچ در مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌ها، نمونهٔ C4-W.I از گروه چهارم به‌صورت کامل توسط نوارهای FRP در یک لایه در تمام ارتفاع ستون دورپیچ شده است. چنان‌چه در جدول(٦) مشاهده می‌شود میزان افزایش جذب انرژی نسبت به نمونهٔ شاهد در این نمونه، ۳۰۷ درصد ثبت شده است که نسبت به نمونه C3-50.II (نمونه‌ی تقویت‌شده با نوارهای منقطع FRP با عرض و فاصلهٔ آزاد ۵۰ میلی‌متر) با همان مقدار مصرف FRP افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. در توضیح دلیل این موضوع می‌توان گفت که نمونه‌های با محصورشدگی کامل در ارتفاع، به‌دلیل پخش یکنواخت‌تر انرژی در کل ارتفاع ستون، ظرفیت بیشتری برای جذب انرژی دارند. با این وجود با توجه به سهولتی که نصب نوارهای منقطع نسبت به نوارهای پیوسته دارد و هم‌چنین سهولت استفاده از لایهٔ میانی در نوارهای منقطع نسبت به نوارهای پیوسته، به‌نظر می‌رسد در بسیاری از موارد، استفاده از نوارهای منقطع کارایی بیشتری نسبت به نوارهای پیوسته خواهد داشت.

ج) تأثیر لایهٔ میانی: مطابق نتایج به‌دست آمده در جدول (٦)، در نمونه‌هایی که در آن‌ها از ورق گالوانیزه به‌عنوان لایهٔ میانی استفاده شده است، میزان بار و تغییرشکل نهایی و هم‌چنین میزان جذب انرژی نسبت به نمونه‌های بدون ورق گالوانیزه افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. نمونه‌های گروه اول که برای ارزیابی میزان کارایی ورق گالوانیزه مورد استفاده قرارگرفت، بیانگر افزایش ۱۲ درصدی بار و ۷۹ درصدی جذب انرژی نسبت به نمونهٔ بدون لایهٔ میانی است. علاوه بر این از نظر کرنش نهایی نیز این نمونه افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی در این تحقیق اثر ورق گالوانیزه به‌همراه بتونه بر میزان افزایش بار، بین ۹ تا ۱٦ درصد برای روش‌های تقویتی مختلف، به‌دست آمده است. از لحاظ میزان جذب انرژی نیز نمونه-

های با ورق گالوانیزه افزایش ۵۳ تا ۲۲٦ درصدی را نشان می‌دهند. برای اطمینان از عدم پیوستگی بین ورق FRP و ورق گالوانیزه و هم‌چنین اطمینان از عدم محصورسازی ستون توسط لایهٔ میانی، در نمونهٔ C4*-S.P-50.I از یک لایه پلاستیک نازک به ضخامت ۰/۰۲ میلی‌متر در حد فاصل بین ورق FRP و ورق گالوانیزه استفاده شده است. این لایه نازک باعث می‌شود که هیچ‌گونه چسبندگی بین ورق FRP و ورق گالوانیزه وجود نداشته باشد. همان‌گونه که از مقایسهٔ ظرفیت باربری ستون‌های C4*-S.P-50.I و C2-S.P-50.I در جدول (٦) مشاهده می‌شود، از لحاظ کسب مقاومت، این دو نمونه مشابه هم می‌باشند، اما جذب انرژی در نمونهٔ C4*-S.P-50.I به‌دلیل کاهش بیشتر تنش‌های برشی انتقالی به ورق تقویتی، بیشتر از نمونهٔ C2-S.P-50.I می‌باشد. به عبارت دیگر به نظر می‌رسد روش‌هایی که تنش‌های انتقالی از بتن به ورق‌های دورگیرکنندهٔ تقویتی را به حداقل می‌رسانند، در افزایش شکل‌پذیری تأثیر بیشتری دارند.

لازم به ذکر است که محصورشدگی مناسب، مستلزم عدم وجود هرگونه فاصلهٔ آزاد بین سطح بتن و عامل دورگیرکننده است. از آن‌جا که در نمونه‌های فشاری اتساع معمولاً در حدود ۸۰ درصد بار نهایی آغاز می‌شود، لذا به‌نظر می‌رسد کارایی بتونه نیز به‌عنوان یک مادهٔ پرکننده به این ناحیهٔ محدود می‌شود. وجود یک مادهٔ پرکننده در فاصلهٔ آزاد بین سطح ستون و ورق لایهٔ میانی می‌تواند تنش‌های شعاعی اندک ایجاد شده در نمونهٔ تحت بارگذاری را قبل از شروع اتساع، به‌صورت تنش حلقوی به ورق تقویتی منتقل نماید. با توجه به عدم وجود هرگونه نقش سازه‌ای بتونه در افزایش ظرفیت باربری می‌توان گفت تأثیر بتونه فقط منحصر به وجود فاصله‌های آزاد بین لایهٔ میانی و سطح بتن بوده و در صورت نبود این فضای خالی، بتونه تأثیری در بهبود عملکرد رفتاری ستون نخواهد داشت. از طرف دیگر وجود فضای خالی و عدم حذف آن‌ها می‌تواند به عملکرد ضعیف ورق تقویتی منجر شود. از آن‌جا که پیش‌بینی وجود یا عدم وجود فضای خالی بین لایه‌ی میانی و سطح بتن در موارد عملی تقویت ستون‌ها غیرممکن است، لذا به‌نظر می‌رسد که به منظور اطمینان از صحت عملکرد سیستم تقویت و کاهش میزان ریسک، لازم است که در تمامی حالات در زیر لایهٔ میانی از بتونه به‌عنوان یک مادهٔ پرکننده استفاده شود.

د) تأثیر عرض نوار تقویتی: برای بررسی اثر عرض نوار می‌توان به گروه‌های ۲ و ٤ از جدول (٦) مراجعه کرد. در گروه ۲ عرض نوارهای تقویتی ۵۰ میلی‌متر است و در گروه ٤ از همان مقدار FRP ولی با عرض ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. چنان‌چه در این جدول مشاهده می‌شود میزان افزایش مقاومت در ستون‌های محصورشده با نوارهای یک لایه‌ی ۵۰ میلی‌متری ٤٤ درصد بوده، درحالی‌که این مقدار برای نوارهای محصورشده با یک لایه نوارهای ۲۵ میلی‌متری ۵۲ درصد می‌باشد. از لحاظ میزان جذب انرژی نیز نوارهای ۲۵ میلی‌متری افزایش بیشتری را نسبت به نوارهای ۵۰ میلی‌متری نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان کارایی ورق گالوانیزه را در نمونه‌های با عرض ورق کمتر به این صورت توجیه کرد که نوارهای با تعداد بیشتر و عرض کمتر با گستردگی بهتر خود در تمام ارتفاع ستون، باعث پخش یکنواخت‌تر انرژی در کل ارتفاع ستون می‌شوند و شرایط محصورکنندگی بهتری را ایجاد می‌کند. هم‌چنین عرض کمتر ورق شرایط محصورشدگی را برای نواحی مرکزی ستون (محل پارگی نوارها)، بهتر فراهم می‌کند و بنابراین محصوریت بیشتر ستون

موجب ظرفیت باربری بیشتر ستون می‌شود. برای نمونه‌های دولایه، با مقایسهٔ ستون‌های C3-S.P-50.II و C4-S.P-25.II، مشاهده می‌شود که عرض نوار تأثیر خاصی در میزان مقاومت و جذب انرژی ندارد. بنابراین می‌توان گفت ستون‌های با محصورشدگی بالاتر(دولایه) به‌دلیل سختی محوری بیشتر، برای رسیدن به پخش یکنواخت‌تر انرژی در ارتفاع خود، نیاز به عرض‌های بسیار کمتر از ۲۵ میلی‌متر دارند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی با استفاده از یک لایهٔ میانی در حد فاصل سطح ستون و عامل محصورکننده، ضمن استفادهٔ بهتر از ظرفیت ورق تقویتی، شکل‌پذیری و میزان باربری ستون افزایش داده شده است. به‌منظور بررسی اهداف تحقیق، ۱۴ عدد ستون بتن‌آرمه به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر پس از تقویت و محصورسازی با نوارهای منقطع CFRP، به روش‌های مختلف، تحت بار محوری فشاری مورد آزمایش قرار گرفت. به‌منظور جلوگیری از انتقال تمرکز تنش ناشی از ترک‌خوردگی ستون و هم‌چنین کاهش تنش‌های برشی وارده به ورق تقویتی، در بعضی از نمونه‌ها از ورق گالوانیزه به‌عنوان لایه میانی استفاده شده است. هم‌چنین از آن‌جا که ممکن است به دلیل اعوجاج سطح ستون یا ورق لایهٔ میانی، مقداری فضای خالی و فاصلهٔ آزاد بین سطح ستون و لایهٔ میانی وجود داشته باشد که باعث تأخیر در فعال شدن ورق تقویتی شود، از یک لایه بتونه، به‌عنوان ماده‌ی پر کنندهٔ این فضاها استفاده شده است. در این تحقیق علاوه بر بررسی اثرات لایهٔ میانی و تأثیر فضای خالی بین سطح بتن و لایهٔ میانی، به بررسی اثر تعداد لایه‌های تقویتی و اثر عرض نوار پرداخته شده است.

مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از آزمایش نمونه‌های موجود در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱. استفاده از ورق گالوانیزه به‌عنوان لایهٔ میانی، مانع از انتقال تمرکز تنش و هم‌چنین تنش‌های چندمحوره به ورق تقویت‌شده و باعث افزایش ۱۶ درصدی بار حداکثر و ۵۳ درصدی میزان جذب انرژی در نمونه‌های تقویت شده با یک لایه الیاف کربن نسبت به نمونهٔ بدون لایه میانی می‌شود.

۲. استفاده از لایه میانی رفتار ستون را از حالت کرنش-نرمی به حالت کرنش- سختی تغییر می‌دهد. در واقع با استفاده از تکنیک جدید می‌توان حالت محصورشدگی ضعیف ستون را به حالت محصورشدگی مؤثر تبدیل نمود. استفاده از لایهٔ میانی باعث می‌شود که بخش دوم منحنی بار-کرنش محوری ستون‌های محصور شده کشیده‌تر شود، که به معنای جذب انرژی بیشتر نمونه است.

۳. وجود فاصلهٔ آزاد بین سطح بتن و لایهٔ میانی به شدت بر کارایی لایهٔ میانی تأثیرگذاراست. استفاده از یک لایه بتونه در زیر لایه میانی از فعال شدن دیر هنگام ورق تقویتی ممانعت می‌کند.

۴. کاهش عرض نوارهای تقویتی از ۵۰ میلی‌متر به ۲۵ میلی‌متر، به‌دلیل پخش یکنواخت‌تر انرژی در ارتفاع ستون، باعث افزایش ۸ درصدی بار حداکثر و ۱۴۰ درصدی جذب انرژی در نمونه‌های تقویت شده با نوارهای یک‌لایه می‌شود.

مراجع

1. Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete Confined By Fiber Composites", *Journal of Structural Engineering,* Vol. 124, pp. 1025-1031, (1998).
2. Structures, C., "ACI Committee 440", American Concrete Institute, ACI, Vol., (2008).
3. No, D.M., "ISIS CANADA RESEARCH NETWORK", (2007).

4. Parretti, R., and Nanni, A., "Axial Testing of Concrete Columns Confined with Carbon FRP: Effect of Fiber Orientation", *Proceedings. CD Proc. of the third international conference on composites in infrastructure,* (2002).

5. Chaallal, O., Shahawy, M., and Hassan, M., "Performance of Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Wrapping", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 7, pp. 200-208, (2003).

6. Theriault, M., Neale, K.W., and Claude, S., "Fiber-Reinforced Polymer-Confined Circular Concrete Columns: Investigation of Size and Slenderness Effects", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 8, pp. 323-331, (2004).

7. Matthys, S., Toutanji, H., and Taerwe, L., "Stress–Strain Behavior of Large-Scale Circular Columns Confined with FRP Composites", *Journal of Structural Engineering,* Vol. 132, pp. 123-133, (2006).

8. Al-Salloum, Y.A., "Influence of Edge Sharpness on the Strength of Square Concrete Columns Confined with FRP Composite Laminates", Composites Part B: Engineering, Vol. 38, pp. 640-650, (2007).

9. Hadi, M., "Behaviour of FRP Wrapped Normal Strength Concrete Columns Under Eccentric Loading", Composite structures, Vol. 72, pp. 503-511, (2006).

10. Yang, X., Nanni, A., and Chen, G., "Effect of Corner Radius on the Performance of Externally Bonded FRP Reinforcement", *Proceedings.5th international. conference. on Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures,* (2001).

11. Yang, X., Wei, J., Nanni, A., and Dharani, L.R., "Shape Effect on the Performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer Wraps", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 8, pp. 444-451, (2004).

12. Toutanji, H., "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets", *ACI Materials Journal,* Vol. 96, (1999).

13. Xiao, Y., and Wu, H., "Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets", *Journal of Materials in Civil Engineering,* Vol. 12, pp. 139-146, (2000).

14. Lam ,L., and Teng, J., "Ultimate Condition of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 8, pp. 539-548, (2004).

15. Cole, C.B., "Performance of FRP-Jacketed Reinforced Concrete Columns Subjected to Uniaxial Compression", Master of Science in Civil Engineering, University of Missouri–Rolla, Rolla, MO, (2001).

16. De Lorenzis, L., and Tepfers, R., "Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with Fiber-Reinforced Polymer Composites", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 7, pp. 219-237, (2003).

17. Pessiki, S ,.Harries, K.A., Kestner, J.T., Sause, R., and Ricles, J.M., "Axial Behavior of Reinforced

Concrete Columns Confined with FRP Jackets", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 5, pp. 237-245, (2001).

18. Shahawy, M., Mirmiran, A., and Beitelman, T., "Tests and Modeling of Carbon-Wrapped Concrete Columns", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, pp. 471-480, (2000).

19. Matthys, S., Taerwe, L., and Audenaert, K., "Tests on Axially Loaded Concrete Columns Confined by Fiber Reinforced Polymer Sheet Wrapping", ACI Special Publication, Vol. 188, (1999).

20. Fraldi, M., Nunziante, L., Carannante, F., Prota, A., Manfredi, G., and Cosenza, E., "On the Prediction of the Collapse Load of Circular Concrete Columns Confined by FRP", *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 3247-3264, (2008).

21. Fam, A.Z., and Rizkalla, S.H., "Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes", *ACI structural journal,* Vol. 98,(2001).

22. Harries, K.A., and Carey, S.A., "Shape and "Gap" Effects on the Behavior of Variably Confined Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 881-890, (2003).

23. Campione, G., "Influence of FRP Wrapping Techniques on the Compressive Behavior of Concrete Prisms", *Cement and concrete composites*, Vol .28 ,pp. 497-505, (2006).

۲٤. ایلیا، الهه، « بررسی رفتار محوری ستون‌های محوری چهارگوش تقویت‌شده با نوارهای FRP در گوشه‌ها و بست‌هـای FRP در وجـوه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان.(۱۳۹۱)

25. Mirmiran, A., Shahawy ,M., Samaan, M., Echary, H.E., Mastrapa, J.C., and Pico, O., "Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 2, pp. 175-185, (1998).

26. Rousakis, T. C., Karabinis, A. I., Kiousis, P. D., "FRP-Confined Concrete Members: Axial Compression Experiments and Plasticity Modeling". *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 7, pp. 1343–1353, (2007).

27. Piekarczyk, J., Piekarczyk, W., Blazewicz, S., "Compression Strength of Concrete Cylinders Reinforced with Carbon fiber Laminate", Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 2365-2369, (2011).